

INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO POR PITE EM PEÇAS TORNEADAS DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO

Márcio Tadeu Gravalos¹, Marcelo Martins¹, Anselmo Eduardo Diniz² e Paulo Roberto Mei²

¹ Sulzer Brasil S/A, marcio.gravalos@sulzer.com

² Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, pmei@fem.unicamp.br

RESUMO

A resistência à corrosão por pite tem sido correlacionada com as condições morfológicas da superfície: um acabamento superficial liso contribui para diminuir o potencial de iniciação de pites. Este estudo teve por objetivo investigar a relação entre a resistência à corrosão por pite e a rugosidade em superfícies usinadas do aço inoxidável superaustenítico ASTM A744 grau CN3MN. As amostras fundidas sofreram um torneamento cilíndrico com diferentes combinações das condições de corte, resultando assim, em diferentes padrões de rugosidade superficial. As superfícies das amostras, então usinadas, foram caracterizadas quanto à rugosidade e ao endurecimento. Após submetidas a um teste por imersão que acelerava a corrosão, estas superfícies foram examinadas num estereoscópio, tendo sido também determinada a perda de peso devido à corrosão. Observou-se que as amostras exibiram diferentes comportamentos com relação à resistência à corrosão, de acordo com as condições de usinagem aplicadas. Uma correlação entre a resistência à corrosão e a rugosidade superficial ficou evidente, assim como à perda de peso devido à formação de pites. Este estudo identificou que a corrosão pode ser controlada através da seleção dos parâmetros de usinagem apropriados.

Palavras chave: Rugosidade superficial; Resistência à corrosão por pite; Aço inoxidável superaustenítico; Controle de corrosão; Parâmetros de usinagem; Torneamento; Encruamento superficial.

ABSTRACT

The pitting corrosion resistance has been correlated to the morphology conditions of surface: a smooth surface finishing contributes to decrease the potential for pitting. This study aimed at investigating the relationship between pitting corrosion resistance and surface roughness in machined surfaces of superaustenitic stainless steel ASTM A744 grade CN3MN. The samples of the casting steel was cylindrical turned with different combination of cutting conditions, leading the surfaces to differing roughness patterns. The surfaces of samples, as machined, were characterized by roughness and hardness. After the application of an accelerated immersion corrosion test, these surfaces were examined in a stereoscopy and the weight loss by corrosion were also determined. It was revealed that the samples exhibited different corrosion resistance behaviours, according to the machining conditions applied. A correlation between pitting resistance corrosion and machined surface roughness was evident, as so to the weight loss due to the formation of pits. This study have identified that the corrosion can be controlled through the selection of appropriate machining parameters.

Key words: Surface roughness; Pitting corrosion resistance; Superaustenitic stainless steel; Corrosion control; Machining parameters; Turning; Surface work hardening.

1 - INTRODUÇÃO

O aço inoxidável superaustenítico, composto por uma estrutura predominantemente austenítica, exibe uma melhor resistência à corrosão por pite, por frestas e sob tensão quando comparado com os aços inoxidáveis austeníticos convencionais da série 300. A liga fundida ASTM A744 CN3MN [01] é uma das opções de material utilizado na fabricação dos componentes de bombas que operam em ambientes marítimos, pois oferece elevados valores de resistência à corrosão por pite. A usinagem é um dos mais importantes processos que está envolvido na fabricação dos componentes de bombas e que torna-se importante conhecer os efeitos deste processo na resistência à corrosão por pite.

Uma superfície com o acabamento o mais liso possível reduz o potencial para a formação de pites [02, 03, 04, 05]. A rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam o acabamento superficial [06]. Durante a usinagem, a seleção dos parâmetros de corte apropriados é muito importante para o controle da corrosão [07, 08]. O torneamento é um dos processos de usinagem básico e mais largamente utilizado dentro dos processos de usinagem que as indústrias utilizam [09] e

também um dos processos mais comuns em pesquisas experimentais em cortes de metal [10]. No torneamento, o avanço e o raio de ponta têm uma contribuição geométrica à rugosidade superficial [11].

O objetivo deste estudo é de determinar a relação entre os parâmetros utilizados no processo de torneamento e a resistência à formação de corrosão por pite, através da análise da influência da rugosidade superficial e da camada endurecida.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas amostras cilíndricas do aço inoxidável superaustenítico tipo CN3MN, com 95 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, fundidas pelo processo estático e solubilizadas a 1170 °C por 2 horas [12]. Na tabela 01 encontram-se a composição química e o valores do PREN (*Pitting Resistance Equivalent*), valor que determina a resistência à corrosão por pite [13, 14], calculado através da equação: $PREN = Cr\% + 3,3Mo\% + 16N\%$.

Tabela 01 - Valores da composição química (% em peso) e do PREN.

ELEMENTO	SI	C	Mo	Cr	SI	NI	P	Mn	Cu	N	PREN
AMOSTRA	0,74	0,015	6,25	20,79	0,008	24,65	0,021	0,63	0,33	0,2	44,6
NORMA	1 Máx.	0,03 Máx.	6,0 a 7,0	20 a 22	0,01 Máx.	23,5 a 25,5	0,04 Máx.	2 Máx.	0,75 Máx.	0,18 a 0,26	≥ 40

As amostras fundidas, com 212±11 HV de dureza, foram submetidas às operações de torneamento em desbaste e acabamento em um torno horizontal CNC Mazak QT25, utilizando o fluido de corte com 6% de emulsão em água, em abundância. Os parâmetros de usinagem utilizados encontram-se na tabela 02. Para operação de acabamento os experimentos foram conduzidos variando-se três parâmetros de usinagem em dois níveis, na seguinte sequência: o avanço (f), a profundidade de corte (a_p) e o ângulo ortogonal de saída do inserto (γ_o). Para a operação de desbaste variou-se o ângulo

ortogonal de saída. Os parâmetros velocidade de corte (V_c) e raio de ponta da ferramenta (R_e) foram fixados [15]. Foram utilizados insertos intercambiáveis de metal duro com tripla cobertura composta de Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN, na geometria ISO CNMG 120404/12 e fixados no porta-ferramenta ISO PCLNR 2525 M1, com ângulo de folga (α) de 6° e ângulo de posição (χ_r) de 95°. Para realização dos ensaios e análises das superfícies, após a usinagem a amostras foram seccionadas conforme demonstrado na figura 01.

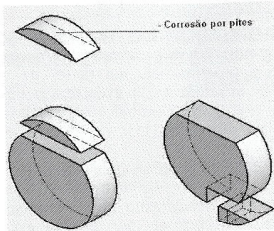


Figura 01 – Amostras seccionadas após a usinagem

A rugosidade na superfície das amostras foi medida, em 3 diferentes posições angularmente equidistante, através do rugosímetro Perthometer M1-Mahr, com valor de *cut-off* de 0,8 mm e comprimento de amostragem igual a 5 mm.

A medição das microdurezas superficiais baseou-se na norma ASTM E 384-07 [16]. Este método estabelece a determinação da microdureza dos materiais através de ensaio de micropenetração feito com um penetrador Knoop ou Vickers. As amostras foram embutidas e as medições foram realizadas no microdureômetro Buehler modelo 1600-6300, aplicando-se uma carga de 50 gf durante 10 segundos. As medidas foram tomadas partindo-se da superfície usinada e em direção ao centro. Após a medição da microdureza, as amostras foram atacadas com água régia e a microestrutura foi observada e fotografada

através do microscópio óptico Zeiss modelo AxioTech.

Para análise da resistência à formação de pites as amostras (ilustradas na figura 01) foram, primeiramente, submetidas a um teste que acelerava a corrosão, sendo imersas em uma solução de cloreto de ferro aquecida a 50 ± 2 °C por um período de 72 horas [3, 17]. Em seguida, as superfícies foram observadas através um microscópio óptico de baixa ampliação, onde foi possível quantificar a densidade dos pites formados por unidade de área. Para conhecer o valor da perda massa, as amostras foram pesadas em uma balança com precisão de 0,001 gramas, antes e depois do teste de imersão.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Análise de rugosidade

Através dos resultados da medição da rugosidade Ra que estão mostrados na tabela 02, pode-se observar que na operação de acabamento o crescimento do avanço (f) aumenta a rugosidade (Ra). Quando a profundidade de corte (a_p) aumenta, para o mesmo valor de raio de ponta da ferramenta (R_e), a rugosidade (Ra) também aumenta. A variação do ângulo de saída (γ_o) teve um efeito pouco significativo. Na operação de desbaste, onde a_p é bem maior que R_e , há uma forte influência do γ_o na rugosidade Ra que comprova a alta ductilidade deste material usinado. Assim, quando o γ_o diminui, aumenta a taxa de deformação do cavaco e da superfície usinada, o que refletiu no aumento da rugosidade Ra.

Tabela 02 – Influência das condições de torneamento nas propriedades superficial do aço inoxidável CN3MN

Inserto		Condições de corte			Rugosidade	Endurecimento superficial		Resistência à corrosão	
R_e (mm)	γ_o	f (mm/rot.)	V_c (m/min.)	a_p (mm)	Ra (μ m)	Dureza (HV _{0,05})	Camada (μ m)	Perda de massa (%)	Densidade (pites/mm ²)
0,4	10°	0,1	60	0,2	0,54	428	265	4×10^{-3}	10×10^{-3}
0,4	10°	0,2	60	0,2	0,76	365	115	13×10^{-3}	25×10^{-3}
0,4	10°	0,1	60	0,4	0,98	433	165	7×10^{-3}	79×10^{-3}
0,4	10°	0,2	60	0,4	1,16	371	215	31×10^{-3}	203×10^{-3}
0,4	0°	0,1	60	0,4	0,89	419	165	4×10^{-3}	27×10^{-3}
0,4	0°	0,2	60	0,4	1,04	401	115	15×10^{-3}	77×10^{-3}
1,2	10°	0,25	60	2,5	1,22	464	165	19×10^{-3}	194×10^{-3}
1,2	0°	0,25	60	2,5	2,28	471	215	29×10^{-3}	215×10^{-3}

3.2 - Análise da dureza superficial

A figura 02 é composta da imagem da microdureza de uma das amostras, análise metalográfica e do gráfico do perfil de

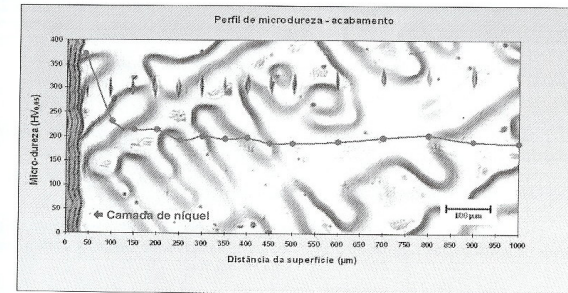


Figura 02 – Exemplo do perfil de microdureza com ataque de água régia (acabamento com o inserto $\gamma_o = 10^\circ$, $V_c = 60$ m/min, $f = 0,2$ mm/v e $a_p = 0,4$ mm).

Através da figura 02 pode-se observar o perfil de dureza da camada endurecida formada na superfície usinada em direção ao núcleo. Uma camada superficial de níquel foi aplicada, antes do ensaio de microdureza, para evitar a expansão do material em direção à borda durante a penetração do diamante. As marcas geradas pelo penetrador de dureza Knoop na estrutura dentrificada também são observadas na figura.

Os resultados mostrados na tabela 02 identificam que em todas as amostras houve um endurecimento superficial numa camada média de 177 ± 35 μ m para o desbaste e de 173 ± 58 μ m para o acabamento. A dureza média alcançada foi de 468 ± 5 HV na operação de desbaste e de 403 ± 29 HV na operação de acabamento. Pode-se notar que a camada endurecida deixada na operação de desbaste (média de 0,18 mm) foi eliminada na operação posterior de acabamento, pois os valores de a_p aplicados foram maiores

(0,2 e 0,4 mm, respectivamente) e formou-se uma nova camada endurecida.

3.3 - Análise da resistência à formação de pites

Os resultados da análise quantitativa dos pites formados na superfície e da perda de massa das amostras durante o teste de corrosão

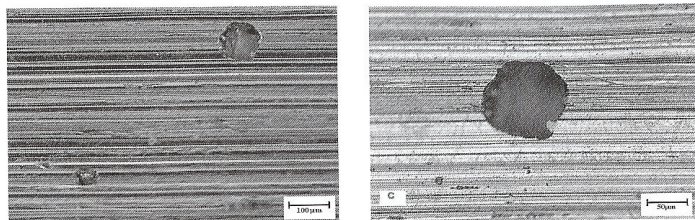


Figura 03 – Pite na superfície com rugosidade Ra = 2,278 µm.

Através das figuras 03 pode-se observar um pite típico de forma

3.4 – Correlação entre as respostas obtidas

Com os resultados da tabela 02 foi possível construir os gráficos das figuras 04 e

acelerada estão demonstrados na tabela 02. As imagens da figura 03 foram obtidas durante a

análise superficial em uma das amostras e representam, em diferentes ampliações, a característica dos pites formado isoladamente durante o ensaio de aceleração da corrosão.

hemisférica [3], com diâmetro da ordem de 100 µm.

05 que comparam, respectivamente, a perda de massa e a densidade de pites com a rugosidade superficial Ra.

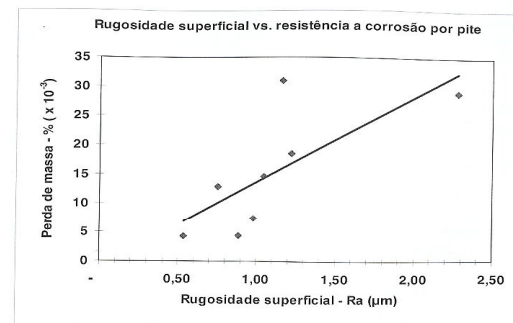


Figura 04 – Gráfico da resistência à corrosão por pite para diferentes rugosidades Ra.

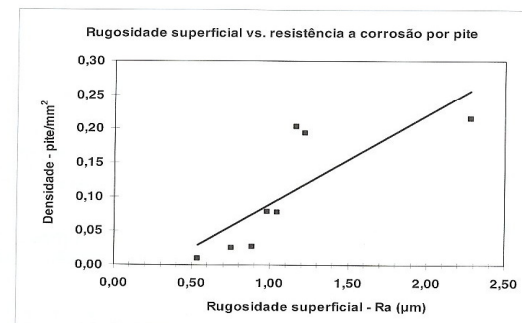


Figura 05 – Gráfico da resistência à corrosão por pite para diferentes rugosidades Ra

Nota-se nos gráficos da figuras 04 e 05 que o aumento de perda de massa e da concentração de pites por unidade de área é influenciado pelo aumento da rugosidade superficial. Para o menor valor de rugosidade de 0,54 µm (acabamento com $f = 0,1$ mm/rot. e $a_p =$

0,2 mm) há pouca perda de massa e de formação de pites. A figura 06 representa o resultado da análise fatorial do efeito da superfície (rugosidade, dureza e tamanho de camada endurecida na usinagem) sobre a resistência à corrosão por pites.

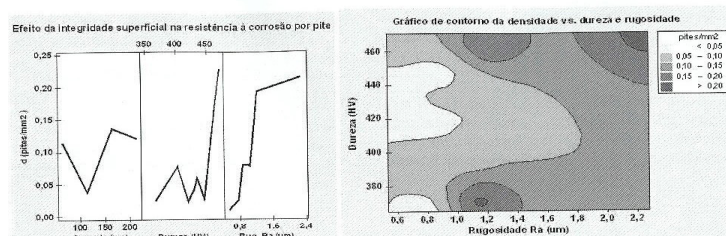


Figura 06 – Efeito da superfície (rugosidade, dureza e tamanho de camada endurecida na usinagem) sobre a resistência à corrosão por pites.

Observa-se uma correlação do aumento da densidade de pites com o aumento da rugosidade RA, mas não é possível identificar uma correlação com a camada endurecida e nem com a dureza superficial, todavia a densidade de pites aumenta muito quando dureza superficial está acima de 450 HV. A formação de pites é minimizada com os menores valores da rugosidade superficial, abaixo de 0,8 µm.

4 - CONCLUSÕES

1. A formação do encruamento, uma camada superficial endurecida, no aço inoxidável superaustenítico ficou evidente em todas condições de usinagem aplicadas durante o torneamento de desbaste e de acabamento.

2. O resultado das análises da resistência à formação de pites nas amostras, quando submetidas ao teste de corrosão acelerada, mostraram uma correlação com a rugosidade superficial. Porém, não foi possível estabelecer uma correlação com a camada superficial endurecida.

3. Um acabamento superficial liso, obtido através da seleção dos parâmetros de usinagem apropriados, contribui no controle de formação dos pites em superfícies usinadas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti e ao Sr. Eliezer Dias Francisco, do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de

Engenharia São Carlos - USP, pela colaboração na realização dos ensaios de microdureza e também ao Prof. Dr. Lalgudi Venkataraman Ramanathan e ao Sr. Olandir Vercino Correa, do Centro de Ciências e Tecnologia de Materiais - IPEN, pela colaboração na realização dos ensaios de corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ASTM A 351/351M-03, *Standard Specification for Casting, Austenitic, Austenitic-Ferritic (Duplex), for Pressure-Containing Parts*, 2003, pp.137-141.
- [02] GRUBB, J. F., DEEMER, D. E., AL-6XN@ALLOY, *Allegheny Ludlum*, USA, 2002, pp. 2-7.
- [03] MOAYED, M. H.; LAYCOCK, N. J.; NEWMAN, R. C., Dependence of the Critical Pitting Temperature on surface roughness. *Corrosion Science*, vol. 45, nº6, Elsevier, 2003, pp. 1203-1216.
- [04] RAMANATHAN, L. V., *Corrosão e seu controle*, 1ª ed., Hemus Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 339 p.
- [05] TECHNICAL DATA OF STAINLESS STEEL AL-6XN@ALLOY, *Allegheny Ludlum Corporation*, Pittsburgh, PA, USA, 1998, 56 p.
- [06] SHAPA TECHNICAL BULLETIN, The Surface Finish of Stainless Steel on Fabricated Itens, nº 1, 2000, p.10.
- [07] BRAMAM, C.; BEN RHOUMA, A.; LÉDION, J.; SIDHOM, H., Effect of machining Conditions on Residual Stress Corrosion Cracking of 316L SS, *Materials Science Forum*, Vols. 490-491, Switzerland, 2005, pp 305-310.
- [08] HASSIOTIS, N.D.; PETROPOULOS, G.P., Influence of surface roughness on corrosion resistance of turned carbon steel parts, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 1, nº2, 2006, pp. 202 – 212.
- [09] SHAW, M.C., *Metal cutting principles*, 2ª ed., Oxford University Press, New York, USA, 2005, 432 p.
- [10] TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K., *Metal Cutting*, 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000, 446 p.
- [11] DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L., *Tecnologia da Usinagem dos Metais*, 4ª ed., Editora Artliber, São Paulo, 2003, 248 p.
- [12] RITONI, M., Efeitos dos tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço superaustenítico ASTM A 744 Gr. CN3MN, Dissertação de Mestrado, *Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas*, 2007, 128 p.
- [13] ASTM A743/743M, *Standard specification for casting, iron-chromium, iron-chromium-nickel, corrosion resistant, for general application*, U.S.A., 1998, 6p.
- [14] ASTM A890/890M - 99, *Standard Specification for Castings, Iron-Chromium-Nickel-Molybdenum corrosion-resistant, duplex (austenitic/ferritic) for general application*, U.S.A., 1999, 4p.
- [15] GRAVALOS, M.T.; MARTINS, M.; DINIZ, A.E.; MEL, P.R., Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN, *REM-Revista Escola de Minas*, Brasil, 2006, pp.83-88.
- [16] ASTM E 384-07, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, U.S.A, 2007, 33p.
- [17] SALINA-BRAVO, V.M.; NEWMAN, R.C., An Alternative Method to Determine Critical Pitting Temperature of Stainless Steels in Ferric Chloride Solution, *Corrosion Science*, vol. 36, nº1, Elsevier, UK, 1994, pp.66-77.